

рациональных условий их работы и диагностической состояния / Фокин А.С.: дисс. докт. техн. наук, 2010, С-Петербург, 330 с.

4. Тезисы доклада «Влияние химической и структурной неоднородности на механические и эксплуатационные свойства трубных сталей»/ Марков С.И., Дуб В.С., Морозова Т.В.: Сборник трудов Международной VI-й Евразийской научно-практической конференции «Прочность неоднородных структур». Москва НИТУ МИСиС, 2012 г.

### **Исследование процессов обработки глубоких отверстий и закрепления труб в деталях теплообменного оборудования АЭУ**

Ягуткин Е. Г., к.т.н. Кондратенко Л. А., Гунин А. В., Могутов И. В.;  
ГНЦ РФ ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», Москва  
8 (495) 675-85-05, YagutkinE@rambler.ru

*Аннотация.* В ОАО НПО «ЦНИИТМАШ» совместно с ОАО «ЗиО – Подольск» выполнен комплекс исследований влияния технологии обработки отверстий в коллекторах парогенераторов, камерах модулей на состояние поверхностного слоя и эксплуатационные свойства изделий. Разработаны рекомендации по обработке глубоких отверстий и закреплению труб в теплообменном оборудовании АЭУ.

*Ключевые слова:* обработка глубоких отверстий, закрепление труб, энергетическое машиностроение, теплообменное оборудование

Конструкция теплообменных аппаратов, применяемых в энергетической отрасли, предусматривает, как правило, наличие деталей типа трубных досок и коллекторов, в отверстиях которых закреплен пучок теплообменных труб. Обработка глубоких отверстий, число которых в ряде конструкций достигает до 11000, является одной из наиболее сложных и трудоёмких операций механической обработки корпусных деталей.

При изготовлении теплообменных аппаратов широкое применение нашли малоуглеродистые легированные и коррозионностойкие стали марок 10X2M, 10ГН2МФА, 09Г2СА, 08X18Н10Т и др.

Ввиду значительных габаритов и массы заготовок трубных досок и коллекторов, а также большого количества глубоких отверстий, обработку наиболее целесообразно выполнять на специальных станках для глубокого сверления, оснащенных системой ЧПУ. При глубоком сверлении в деталях теплообменной аппаратуры в основном применяются инструменты с внутренним отводом стружки (типа ВТА) и ружейные свёрла. С учетом требований по качеству поверхностного слоя и точности обработанных отверстий, после предварительного сверления может потребоваться развёртывание [1].

По сравнению с ружейными свёрлами, инструмент с внутренним отводом стружки обладает рядом преимуществ: более высокой жёсткостью стебля, что положительно влияет на точность размеров и формы отверстия, отсутствием контакта стружки с обработанной поверхностью, что благоприятно сказывается на качестве обработанной поверхности, возможностью быстрой замены режущей головки, что упрощает обслуживание. Современной тенденцией стало все более широкое применение в конструкциях инструмента сменных непереключаемых твёрдосплавных режущих пластин, в том числе с износостойкими покрытиями.

Применение инструмента ВТА требует обеспечения гарантированного дробления стружки, необходимого для надёжной её эвакуации, что при сверлении малоуглеродистых легированных и коррозионностойких сталей с высокими пластическими и прочностными свойствами является сложной задачей.

Количество и геометрические параметры стружкоделителей и стружколомных порожков определяются свойствами обрабатываемого материала и режимами резания. Эффективная работа стружколомных порожков обеспечивается в определенном диапазоне режимов резания (скоростей резания и подачи).

Для сталей, применяющихся при изготовлении теплообменной аппаратуры, дробление

стружки обеспечивается при подачах 0,07 ... 0,14 мм/оборот. Верхний предел подачи ограничивается прочностью корпуса инструмента, износостойкостью и прочностью режущих пластин. Скорость резания составляет 50 ... 70 м/мин в зависимости от свойств обрабатываемого материала и применяемого твёрдого сплава. Указанные режимы резания обеспечивают высокую производительность обработки. Вместе с тем работа на данных режимах сопровождается сравнительно высокой (до 0,2 мм) разбивкой диаметров просверленных отверстий, формированием в поверхностном слое растягивающих остаточных напряжений 1-го рода и повышенным износом кондукторных втулок.

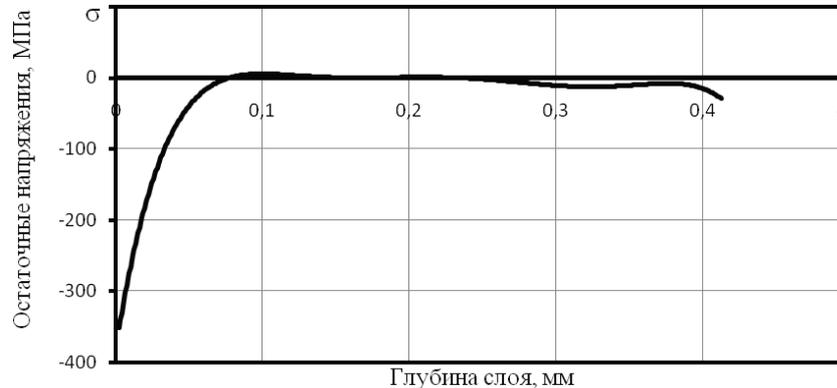
Кроме того, эффективность работы инструмента зависит от стабильности свойств материала заготовки, что не всегда обеспечивается для заготовок больших размеров и массы. Наличие карбидных или силикатных включений, различная твёрдость материала в пределах одной заготовки затрудняют подбор геометрии режущей части и эффективных режимов резания.

К примеру, при обработке ряда заготовок стали 09Г2СА, имеющих большое количество силикатных включений, инструментом ВТА со сменными твёрдосплавными неперетачиваемыми пластинами, со стружкоделителями и стружколомными порошками, включения высокой твердости оказывают абразивное воздействие, вызывая интенсивный износ режущих пластин как по задней, так и по передней поверхности, что приводит к изменению геометрической формы пластин. Ширина фаски износа увеличивается к периферии режущей пластины. При работе с изношенной режущей кромкой происходит изменение направления схода стружки, в результате чего она не упирается в стружколомные порошки и не дробится. Фаска износа по передней поверхности режущей пластины начинает выполнять роль своеобразного порошка, изменяющего направление схода стружки. Увеличение подачи на оборот до некоторого предела позволяет компенсировать влияние фаски износа на эффективность стружкодробления. Но увеличение подачи приводит к росту нагрузок и более интенсивному износу режущей пластины и корпуса инструмента. Для обработки стали 09Г2СА эффективные значения подач составляют 0,08 ... 0,1 мм/оборот. Дальнейшее увеличение подачи ограничено прочностью корпуса инструмента и стойкостью режущих пластин.

В условиях, когда эффективность инструмента со стружкоделителями и стружколомными порошками мала, целесообразным становится применение другого принципа дробления стружки. В этом случае стружка дробится в результате скручивания в корпусе режущей головки, а не от упора в стружколомный порожек. Режущая часть инструмента имеет упрощенную геометрию, без стружкоделителей, что делает рациональным применение напайных режущих пластин с возможностью многократной переточки. Для обеспечения надёжного дробления стружки действует ограничение по её толщине, что достигается снижением подачи на оборот. В зависимости от геометрии режущей части инструмента и свойств обрабатываемого материала, эффективное дробление и эвакуация стружки обеспечиваются при подачах 0,02 ... 0,04 мм/оборот. Применение меньших подач нецелесообразно из-за снижения производительности обработки. При сверлении на указанных режимах резания нагрузки на режущей кромке значительно меньше и износ происходит преимущественно по задней поверхности режущей пластины. Инструмент сохраняет стабильность характеристик в условиях серийной обработки отверстий, менее чувствителен к неоднородностям материала обрабатываемой заготовки. Кроме того, работа в таких условиях приводит к меньшей (до 0,05 мм) разбивке диаметра просверленных отверстий, формированию в поверхностном слое остаточных напряжений сжатия. В ряде случаев, при отсутствии особых требований к состоянию поверхности, возможна однопроходная обработка (без дополнительного развертывания), что частично компенсирует увеличение трудоемкости обработки за счет понижения режимов резания.

При изготовлении деталей теплообменной аппаратуры, предназначенной для АЭС, нередко выдвигаются особые требования к состоянию поверхностного слоя обработанных отверстий. Не допускается наличие рисок, ограничивается степень деформационного упрочнения поверхностного слоя, исключается наличие остаточных напряжений растяжения. Для

гарантированного обеспечения указанных требований необходимо применение финишной обработки – развёртывания. Целесообразно применение развёрток специальной конструкции, которые крепятся на тот же стержень, что и головка инструмента ВТА при предварительном сверлении, чем обеспечивается обработка детали на одном рабочем месте за одну установку. Припуск под развёртывание определяется толщиной слоя, имеющего растягивающие остаточные напряжения. После операции развёртывания в поверхностном слое отверстия формируются остаточные напряжения сжатия (рисунок 1).



**Рисунок 1. Остаточные напряжения в образце из стали 10ГН2МФА при сверлении сверлом с напайными пластинами ( $V_{св} = 67$  м/мин;  $S_o = 0,022$  мм/об) и развёртывании быстрорежущей развёрткой ( $V_{разв} = 20$  м/мин;  $S_o = 0,3$  мм/об)**

При выводе развёртки из отверстия часто остается след от элементов режущей части инструмента глубиной 3...5 мкм. В этом случае необходимо выводить инструмент из отверстия с вращением, сохраняя подачу на оборот такую же, как и при развёртывании. Применение развёртки позволяет не только обеспечить требуемые характеристики поверхностного слоя обработанных отверстий, но и компенсировать возможные погрешности, возникающие в процессе предварительного сверления. С учетом высокой стоимости обрабатываемых изделий и недопустимости отклонений двухпроходная обработка является обоснованной.

Перечисленные технологические приемы позволяют с высокой эффективностью решать задачи обработки глубоких отверстий в материалах, применяющихся в энергетическом машиностроении. Закрепление труб в глубоких отверстиях также является трудоемкой и ответственной операцией.

Закрепление теплообменных труб в глубоких отверстиях обычно осуществляется по следующей технологии: подвальцовка, обварка концов труб, гидравлическая раздача практически по всей толщине доски (решетки) трубной, механическое вальцевание концевых участков узла крепления.

Гидравлическая раздача осуществляется давлением жидкости (обычно дистиллированная вода) с помощью специальных устройств, обеспечивающих создание давления порядка  $p = 200...400$  МПа. Конструкция одного из подобных устройств приведена на рисунке 2.

Здесь масло давлением до  $p = 38$  МПа подводится в камеру 6 от насосного блока. От насосного блока в камеру 7 подводится также вода. После создания давления в камере 6 вследствие мультипликации в камере 3, а затем и в камере на трубе между уплотнительными кольцами развивается требуемое высокое давление, вызывающее пластическую деформацию трубы с последующим ее прижатием к стенке отверстия.

Герметичность в данном узле крепления обеспечивается кроме сварки и роликовым вальцеванием. Схема взаимодействия ролика, веретена и трубы при раздаче с помощью 3-х роликовой вальцовки приведена на рисунке 3. Здесь не показан корпус, в прорезях которого располагаются 3 ролика.

Сечение рабочего участка зоны вальцевания роликовым инструментом с указанными силовыми воздействиями изображено на рисунке 4.

Во время обкатывания ролик оказывает на участок трубы сложное воздействие:

а) от радиальной силы  $F_{rci}$  развиваются изгибающий момент; в зоне контакта появля-

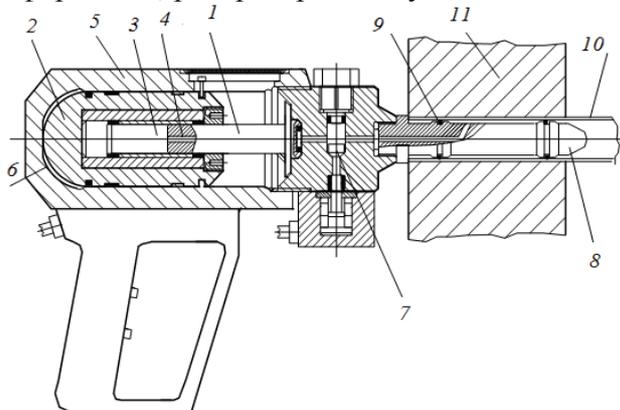
ются переменные по толщине стенки радиальные и окружные нормальные напряжения; вальцуемый участок трубы удлиняется и изгибается из-за внедрения ролика;

б) от окружной силы  $F_t$  образуется момент;

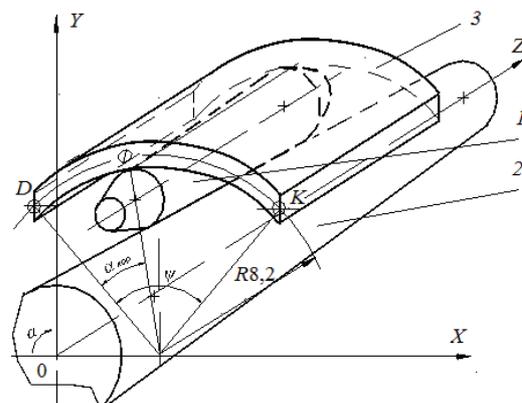
в) осевая сила, действующая на ролик, одновременно приложена и к трубе. При этом в зоне контакта ролика развиваются касательные напряжения, которые приводят к пластической деформации и удлинению трубы;

д) во время обкатывания между трубой и роликом имеет место проскальзывание;

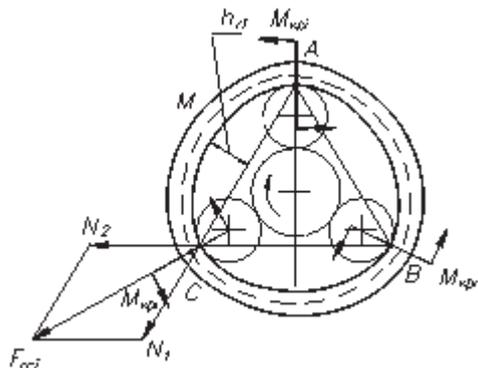
е) ролик из-за перекрещивания оси вращения роликов и веретена с углом  $\gamma$  создает волну деформации, распространяющуюся в осевом и окружном направлениях.



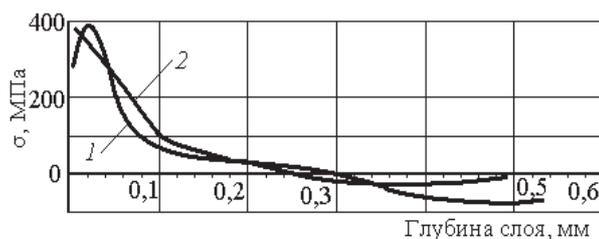
**Рисунок 2. Инструмент (пистолет) конструкции “НУТЕХ” для закрепления теплообменных труб в трубных решетках методом раздачи жидкостью высокого давления и метод гидрораздачи труб: 1 - шток; 2 - поршень; 3 - камера высокого давления (ВД); 4 - канал подвода жидкости ВД; 5 - корпус; 6 - камера низкого давления масла; 7 - камера клапанной коробки; 8 - зонд; 9 - уплотнительные кольца; 10 - труба; 11 – доска**



**Рисунок 3. Взаимодействие веретена ролика и трубы в процессе вальцевания: 1 - ролик конический; 2 - веретено; 3 – труба**



**Рисунок 4. Сечение трубы в зоне вальцевания**



**Рисунок 5. Эпюра остаточных напряжений в поверхностном слое внутренней поверхности трубы из стали 07X12NMФБ после вальцевания: 1 – образец №1; 2 - образец № 2**

Указанные воздействия в трубе приводят к появлению остаточных напряжений определяющихся оптико-механическим методом Н.Н. Давиденкова. При проведении экспериментов изготавливались трубчатые образцы с последующей отрезкой колец шириной 6 мм. При этом проводились замеры изменения диаметра отверстия после вырезки, отрезки и при разрезке образца. Травление образцов проводилось при постоянной силе тока равной 3А, а регистрация перемещений флажка, прикрепленного к образцу при травлении, производилась бесконтактным способом, лазером.

Некоторые результаты исследований приведены на рисунке 5.

## Литература

1. Исследование состояния поверхностного слоя глубоких отверстий в деталях ответственных теплообменных аппаратов/ Терехов В.М.: М.: Технология машиностроения, 2001, № 3, - с. 41-45.
2. Механика контактного взаимодействия/ Джонсон К.: М. Мир. 1989 – 510 с.
3. Колебания и методы управления скоростью движения технологических объектов/ Кондратенко Л. А.: МГОУ. М. 2005 - 448 с.

### Функционально-ориентированные технологии обработки рабочих поверхностей деталей машин

д.т.н. Суслов А.Г.

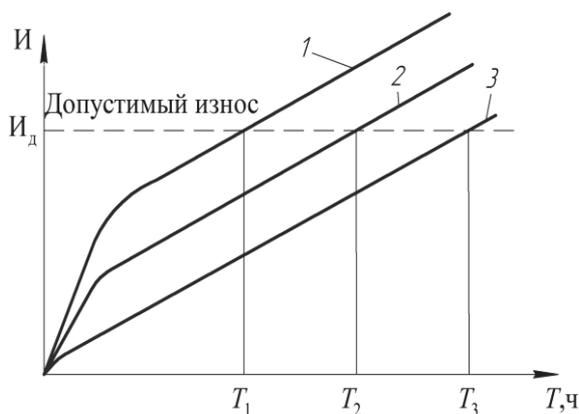
Московский государственный индустриальный университет  
8 (903) 869-70-63, naukanm@mashin.ru

*Аннотация.* В статье изложена методология создания инновационных технологий обработки рабочих поверхностей деталей машин, исходя из их функционального назначения. Приведены примеры этих методов обработки.

*Ключевые слова:* эксплуатационные свойства, качество поверхности, технологическое обеспечение, долговечность

Все разрушения деталей начинаются с их рабочих поверхностей. Поэтому технологии их обработки уделяют особое внимание.

Так как окончательное качество поверхности с учетом явления технологической наследственности формируется при окончательной чистовой обработке, то наибольшее количество инноваций, как правило, приходится на эту финишную обработку.



**Рисунок 1.** Кривые износа поверхности трения различной формы и качества: 1 и 2 – неоптимальная исходная форма и качество; 3 – оптимальная эксплуатационная форма и качество, полученные при окончательной обработке рабочей поверхности трения;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  – соответствующие долговечности поверхности трения при допустимом износ  $U_d$



**Рисунок 2.** Структурная схема воздействия различных факторов на заготовку по окончательной обработке рабочей поверхности и при ее эксплуатации детали: 1, 2, 3, 4 – кинематическое, силовое, температурное и химическое воздействие на рабочую поверхность соответственно

Научное совершенствование и создание новых методов обработки ведется с учетом функционального назначения рабочих поверхностей деталей. Например, если рабочая поверхность функционирует в условиях трения и изнашивания то в соответствии с трибологической наукой, окончательный метод обработки должен обеспечить ее оптимальную форму